

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TÄPPISTEADUSTE VALDKOND
ÖKOLOOGIA JA MAATEADUSTE INSTITUUT
GEOGRAAFIA OSAKOND

Mairika Kõlvart

**MAKROVETIKATEST BIOGAASI TOOTMISE
POTENTSIAAL**

Bakalaureusetöö keskkonnatehnoloogias (12 EAP)

Lubatud kaitsmisele:

Juhendaja allkiri:

Juhendaja: PhD Kuno Kasak

TARTU 2018

Makrovetikatest biogaasi tootmise potentsiaal

Sõltumine fossiilsetest kütustest on ajendanud otsima uusi keskkonnasõbralikke lahendusi taastuvate energiaallikate näol. Üheks alternatiiviks on biogaas. Biogaasi tootmiseks anaeroobse käärituse teel saab kasutada erinevaid lähtematerjale (maismaakultuure, sõnnikut jm). Uudseks lahenduseks peetakse vetikate kasutust kääritusprotsessi toormena. Antud töö jaoks ning potentsiaali hindamiseks koostatud tabel kinnitab vetikate omaduste varieeruvust. Tabelis on kajastatud erinevate kääritusprotsessi lähtematerjalide biogaasi kogused kogu substraadist ja orgaanilisest kuivainest, metaanisisaldusmaht, kuivaine protsent ning orgaanilise kuivaine osakaal kogu kuivainest. Makrovetikate puhul jäävad parameetrite keskmised väärtused kolmel korral viiest kõige madalamateks. Eestis toimub agariku kogumine traalimise teel, kuid vesiviljelusega ei tegeleta. Potentsiaal selleks oleks Hiiumaa ja Saaremaa piirkonnas.

Märksõnad: *biogaas, anaeroobne kääritamine, vetikad, makrovetikad*

CERCS: T270 Keskkonnatehnoloogia, reostuskontroll

Potential of biogas production from macroalgae

Dependence on fossil fuels has led to new, environmentally friendly solutions in the form of renewable energy sources. One of these solutions is biogas. Anaerobic fermentation can be used for the production of biogas using different starting materials (energy crops, manure, etc.). A new solution is the use of algae as a substrate for the fermentation process. The table made for this paper and for potential assessment confirms the variability of algal characteristics. The table shows the quantities of biogas from different sources of fermentation starting from the whole substrate and organic matter, the content of methane, the percentage of dry matter, and the proportion of organic solids in total dry matter. For macro-algae, the average values of the parameters remains lowest in three cases. In Estonia agaric is collected by trawling, but culturing is not dealt with. The potential for this would be in Hiiumaa and Saaremaa.

Keywords: *biogas, anaerobic digestion, algae, macroalgae*

CERCS: T270 Environmental technology, pollution control

Sisukord

| | |
|--|-----------|
| Sisukord | 3 |
| Sissejuhatus..... | 4 |
| 1. Biogaas | 6 |
| 1.1 Biogaasi tootmistehnoloogiad | 7 |
| 1.2 Biogaasi tootmisetapid..... | 9 |
| 2. Makrovetikate üldiseloostus | 10 |
| 2.1 Makrovetikad biogaasi tootmiseks..... | 11 |
| 2.2 Läänemere näited..... | 13 |
| 2.3 Võimalikud vetikaliigid biogaasi tootmiseks (Eestis ja Läänemeres) | 14 |
| 2.3.1 Rohevetikad | 14 |
| 2.3.2 Pruunvetikad | 14 |
| 2.3.3 Punavetikad..... | 15 |
| 2.4 Makrovetikate potentsiaal Eestis | 16 |
| 2.5 Makrovetikate efektiivsus võrreldes teiste biogaasi substraatidega | 18 |
| 3. Arutelu..... | 23 |
| Kokkuvõte | 26 |
| Summary..... | 27 |
| Kasutatud kirjandus | 28 |

Sissejuhatus

Tänapäeval on oluliseks probleemiks saanud inimeste suur sõltumine fossiilsetest kütustest ning sellest tingitud globaalne soojenemine (Marquez et al., 2015). Probleemi suurendab veelgi rahvastiku hüppeline kasv ning sellega kaasnenud energia ja toidu nõudluse tõus (Barbot et al., 2016). Energiaprobleemide lahendamiseks on hakatud otsima ning uurima erinevaid alternatiivseid energiaallikaid, millest üks on biogaas. Biogaas on üks odavamaid viise, kuidas alternatiivselt energiat ning kütust toota (Marquez et al., 2015). Madal hind on tingitud toorme suurest varieeruvusest (Marquez et al., 2015). Praeguseks on olemas nii esimese kui teise generatsiooni biokütused: esimese generatsiooni biokütused on valmistatud söödavatest põllusaadustest (näiteks mais, peet jm), teise generatsiooni biokütused valmistatakse jäätmetest (Montingelli et al., 2015). Räägitud on ka kolmanda generatsiooni biokütustest, mille toormena kasutatakse makro- ja mikrovetikaid (Barbot et al., 2016; Montingelli et al., 2015).

Hetkel kasutatakse maailmas umbes 21 miljonit tonni vetikaid, millest 800 000 tonni korjatakse looduslikest allikatest ning ülejäänud saadakse vesiviljeluse teel (White and Wilson, 2015). Kasutusel on aga peamiselt toidu-, meditsiini- ja kosmeetikatööstus (Barbot et al., 2016). Arvestades, et vetikad ei vaja maismaad, nende produktsioon on kõrge ning nende aastane energiapotentsiaal ulatub ligikaudu 27 777 777.8 GWh-ni (maismaa energiakultuuridel 6 111 111.1 GWh), sobiksid vetikad ka biogaasi tootmiseks (Montingelli et al., 2015). Biomass gaasi tootmiseks võib olla nii vesiviljelusest, looduslikust keskkonnast kui ka tööstustest pärinev (vetikajäätmed) (Barbot et al., 2016).

Eestis on vetikaid kogutud vaid looduslikult agariku töötlemiseks ning furcellaraani (geelistuva polüsahhariidi) tootmiseks ("ESTAGAR – The heart of Marmalade"). Katsetatud on vetikate kasvatamist merelises keskkonnas koostöös Eesti Mereinstituudiga näiteks sumpade abil, mis talveperioodil kinnitatakse merepõhja, et nad vastu peaks mere liikumisele (Teder, 2013). Kasvatuse jaoks aga sobivat lahendust ei ole veel leitud.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on analüüsida kirjanduse põhjal makrovetikatest biogaasi tootmise võimekust, võrreldes teiste substraatidega ning uurida selle potentsiaali Eestis.

1. Biogaas

Biogaas tekib orgaanilise aine lagunemise käigus ning on oma olemuselt looduslik biokeemiline protsess (Masing, 1992). Koostisosadeks on peamiselt metaan (45-70%) ja süsinikdioksiid (30-55%), kuid koostisest võib leida vähesel määral ka lämmastikku, vesiniksulfiidi ning muid gaasijääke (Masing, 1992). Looduses esineb biogaasi teke eelkõige soostunud aladel, kuid protsessi võib kohata ka prügilates (Kukke, 2015). Tööstuslikult toimub biogaasi tootmine kindlal temperatuuril ning suletud tingimustes, kus toimub biolauguneva toorme (sõnnik, rohtne biomass jt) anaeroobne kääritamine. Biogaasi kütteväärtuseks, olenevalt toormest, on 5,6-6,9 kWh/m³ (Masing, 1992).

Kõige olulisem komponent biogaasisegus on metaan. Metaan teeb biogaasist väärtusliku ja laialdaselt kasutatava taastuva energiaallika, kuna seda saab kasutada fossiilsete kütuste asemikuna nii soojuse kui ka elektri tootmisel ja sõidukite kütusena (Tilk, 2017). Euroopa Liidus on biogaas tarbimisel suures osas soojuse ja elektri koostootmisjaamades, kuid aina rohkem suunatakse seda ka biometaani kujul maagaasivõrkudesse (Kask, 2010). Kuigi biogaasi tootmine on kallim kui fossiilsetel kütusel põhinev energia, limiteeritakse süsihappegaasi emissioone ja kehtestatakse makse, mis muudavad biomassi energia konkureerivaks (Chynoweth, 2005).

Eestis on hetkeseisuga Eesti Biogaasi Assotsiatsiooni (2014) kohaselt 17 biogaasijaama, millest viis töötavad põllumajanduslike substraatide (eelkõige sõnniku) peal. Nendeks on Aravete Biogaas OÜ, Tartu Biogaas OÜ, Oisu Biogaas OÜ, Vinni Biogaas OÜ ja Saare Economics OÜ (Eesti Biogaasi Assotsiatsioon, 2014). Jaamad paiknevad peamiselt mandri keskosas (va Saare Economics OÜ, mis asub Saaremaal).

1.1 Biogaasi tootmistehnoloogiad

Põhilisteks biogaasi tootmise komponentideks on orgaaniline aine ja vaba vesi ning põhilisteks tootmistehnoloogilisteks elementideks on biomassihooldla, eeltöötlus- ja etteandeseadmed, põhikäriti, biogaasihooldla ning järelkäritusmahuti või jääkide hooldla (Olt et al., 2007). Viimaste tööpõhimõtted ning toimemehhanismid võivad varieeruda suuresti. Biogaasi tootmistehnoloogiad saab täpsemalt jaotada erinevate kriteeriumite alusel: protsessi etappide arv (ühe- või kaheetapiline), protsessi temperatuur (psühro-, meso- või termofiilne või termotolerantne), käritusmahuti täitmisviis (perioodiline, pooltsükliline või pidev) ja substraadi kuivaine sisaldus (märg- või kuivkäärimine) (Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009). Milliseid tootmistehnoloogiad kasutada oleneb substraadi olemusest.

Biogaasi tootmine kärituskambris toimub neljas etapis, kas ühe- või kaheastmeliselt. Üheastmeline tootmisprotsess toimub juhul, kui kõik need neli etappi toimuvad ühes käärimiskambris (Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009). Kaheastmelistes tootmisprotsessides toimuvad hüdrolyüs ja atsidogenees erinevates kambrites ning on järgnevatest etappidest eraldatud, tagamaks suurema gaasitootlikkuse (Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009).

Biogaasi on võimalik toota nii psührofiilsetes (10...25 °C), mesofiilsetes (30...35 °C), termotolerantsetes (40...45 °C) kui ka termofiilsetes (50...60 °C) tingimustes (Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009). Tänapäeval valitakse protsessi läbiviimiseks enamjaolt 30...35 kuni 40...45 kraadne temperatuur, mis vastab mesofiilsele ja termotolerantsele režiimile (Olt et al., 2007). Psührofiilne ei ole sobilik tööstustele suure ajakulu tõttu ning termofiilne ei täida nõudmisi suure energiakulu ja seega ka kõrge hinna tõttu ning protsessi suurema ebastabiilsuse tõttu (Tilk, 2017).

Käritusmahutit on võimalik täita perioodiliselt, pooltsükliliselt ja pidevalt (Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009). Perioodiline täitmine (tsükliline täitmine) tähendab, et reaktorit täidetakse teatud aja tagant (Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009). Samal ajal jälgitakse gaasi produktsiooni: peale maksimumini jõudmist tekib toodangus langus, siis teatakse, et aeg on reaktorit täita värske substraadiga (Olt et al., 2007). Pooltsüklilise

täitmise puhul toimub täitmine pidevalt kuni hetkeni, mil kääritisse enam ei mahu (Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009). Täitmisega toimub samaaegselt põhjakihtide käärimine ning kui kääriti on täis laetud, tekib olukord, mil reaktoris on erineva käärimistasemega substraati ehk osa käärinud massist suunatakse varem välja (Olt et al., 2007). Suurimaks miinuseks sellise täitmise puhul on mittelõplik käärimine (Olt et al., 2007). Kolmas variant on pidev täitmine. Kui tegu on biogaasitehasega, mis nõuab pidevat täitmist, siis on reaktoris substraadi mass püsiv (Olt et al., 2007). Kui kääritisse lisatakse biomassi, siis väljub sama kogus juba käärinud massist järelkääritisse (Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009).

Kuivaine sisaldus substraadis liigitab kääritamise kaheks: kuiv- ja märgkääritamiseks. Kuivkääritus tähendab, et kuivaine sisaldus kääritis on 20-40%, märgkäärituse korral jääb see protsent alla 15-ne ning see on pumbatav (Tilk, 2017). Mõlemal juhul peab keskkond jääma vedelaks. Rohkem ning vetikate puhul on kasutusel märgkääritus (Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009), sest nii on substraat pumbatav ning ei nõua eritehnikat.

1.2 Biogaasi tootmisetapid

Biogaasi tootmine käärituskambris toimub neljas etapis, üldiselt kas ühe- või kaheastmeliselt (Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009).

Esimeseks etapiks on hüdrolyüs, mille käigus substraadiks olev orgaaniline materjal (nt mõni makrovetika liik) lagundatakse lihtsamateks orgaanilisteks ühenditeks ehk süsivesikud, valgud ning rasvad muudetakse aminohapeteks, suhkruteks ja rasvhapeteks (Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009). Ensüümid, mis on vajalikud protsessi läbiviimiseks, toodetakse protsessis osalevate bakterite poolt (Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009).

Teiseks etapiks on atsidogeneesiprotsess, kus tekkinud vaheproduktid lagundatakse lenduvateks orgaanilisteks hapeteks, süsihappegaasiks ning vesinikuks, väiksel hulgal tekib ka alkohole ja piimhapet (Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009). Protsess toimub happeid produtseerivate bakterite abil (Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009).

Kolmandaks etapiks on atsetogeneesiprotsess, mis on vajalik äädikhappe, vesiniku ja süsihappegaasi (biogaasi eelained) saamiseks (Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009). Kuna äädikhappebakterid ehk äädikhapet tootvad bakterid saavad tegutseda vaid teatud vesiniku kontsentratsioonil, on oluline tihe elukeskkond koos metaanibakteritega, mis tagab happeid tootvatele bakteritele head elutingimused ja metaani tekke vesinikust (Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009).

Viimaseks sammuks on metanogeneesiprotsess, kus toimub metaani ja süsihappegaasi tootmine metanogeensete bakterite poolt (McKennedy and Sherlock, 2015).

2. Makrovetikate üldiseloomustus

Vetikad on laialt levinud ja mitmekesine organismide rühm, mille esindajaid leidub väga erinevates värvides, kujudes ning suurustes. Ka elukeskkonna poolest on vetikad väga heterogeensed. Erinevaid vetikaliike võib kohata nii ariidsetest piirkondades kui arktilistes ja nii mageveekeskkondades kui ka kõrge soola sisaldusega meredes (Griffiths et al., 2011). Vetikad hangivad vett ja toitaineid kogu keha pinnaga (tallusega) ning kõikides vetikates toimub fotosüntees (Trei, 1991). Lisaks on neil kiire kasvutempo (võrreldes maismaataimedega) (Chynoweth, 2005; FAO, 2009). Ehituse ja suuruse järgi saab vetikaid liigitada makro- ja mikrovetikateks .

Makrovetikad, millele ka käesolevas töös keskendutakse, on silmaga nähtavad ning hulkraksed organismid, mille suurus võib küündida mõnest sentimeetrist mitmekümne meetrini (Heitur, 2014). Kasvuks on oluline süsihappegaasi (umbes 1,8 tonni CO₂ 1 tonni biomassi kasvatamiseks), valguse ja toitainete (olulisemateks lämmastik ja fosfor) olemasolu (FAO, 2009). Nii mikro- kui makrovetikaid saab liigitada rohe-, pruun- ja punavetikateks (Heitur, 2014). Rohevetikad elutsevad veekogu pinna lähedal, kus on palju valgust, sügavamal pruunvetikad ning veel halvemates valgustingimustes punavetikad.

Vetikate keemiline koostis on üks kõige olulisemaid faktoreid bioenergia tootmisprotsessis, sest selle kaudu on võimalik arvutada metaanitekke potentsiaali ja ammooniumi saagikust (Sabunas et al., 2017). Suure eelise teiste substraatide ees annavad vetikatele hästi lagunevatest polüsahhariididest rakuseinad, mis tagavad efektiivsema hüdrolyüsi suhkruteks ning täiuslikuma metanogeneesi (FAO, 2009). Suur polüsahhariidide osakaal (ligikaudu 60%) tingib ka väiksema proteiini- ja lipiidisisalduse (Balina et al., 2017; Morand ja Merceron, 2005; Vanegas ja Bartlett, 2013). Teiseks vetikate eeliseks on madal ligniini ja tselluloosi sisaldus, mis on anaeroobses kääritusprotsessis halvasti lagunevad ühendid (Morand ja Merceron, 2005; Vanegas ja Bartlett, 2013).

2.1 Makrovetikad biogaasi tootmiseks

Makrovetikate kasutus biogaasi tootmiseks algab toorme kogumisest. Üks võimalustest on vetikaid koguda looduslikest allikatest ehk rannikutelt ja avamerest. Variandi positiivseks küljeks on väiksem energiakulu võrreldes vesiviljelusega (Balina et al., 2017). Eestis on vetikaid kogutud Kassari lahest agari (täpsemalt estagari, *Furcella lumbricalis*) tootmiseks 1960-ndatel aastatel (Trei, 1991). Otse merest kogutud vetikate puhul peab aga arvestama, et varude hulk on piiratud ning seda saab teha vaid kindla limiidi piires (Trei, 1991). Põisadru (*Fucus vesiculosus*), mida suurtes kogustes rannikule uhutakse, on Eestis kasutusel olnud vaid väetisena, sisaldades kaks korda rohkem lämmastikku ja kolm korda rohkem kaaliumi kui laudasõnnik (Trei, 1991). Need markovetika liigid oleksid potentsiaalsed toormed ka biogaasi tootmiseks.

Merest ja rannikult korjatavate vetikate positiivseks omaduseks on ka veekvaliteedi parandamine aladel, kus probleemiks eutrofeerumine ehk veekogude kinnikasvamine (nt Läänemeri) (Barbot et al., 2016). Rannikule kandunud vetikate kiire lagunemise korral eritatakse keskkonda kasvuhoonegaase ning toksilisi ja tervist kahjustavaid aineid, mistõttu oleks vajalik teha randades puhastusteid (Barbot et al., 2016).

Kuna looduslikult kasvavate ning rannikule uhutud vetikate kogus on ettearvamatu ja ebastabiilne ning nende kogumine ei ole suurel skaalal jätkusuutlik (FAO, 2009), siis räägitakse aina enam ka vesiviljelusest. Ajalooliselt on vetikaid kasvatatud toidu, ravimite ja sööda tarbimise eesmärgil, kuid neid teadmisi on võimalik suunata ka energiatootmisvaldkonda (FAO, 2009). Makrovetikate puhul lubab just suurus neid kasvatada avamerel ehk luua merelisi energiapõlde (FAO, 2009; Hughes et al., 2012). Kuid peab arvestama, et sellega kaasneb hapniku kontsentratsiooni hüppeline langus öösi, mis võib ohustada mere ökoloogilist ja liigilist tasakaalu hävitades teisi liike ökosüsteemis (FAO, 2009).

Biogaasi tootmiseks on oluline ka toorme transport kaldale, mis sõltub vetikamassi kaugusest kaldast või sadamast (FAO, 2009). Transporti raskendab asjaolu, et värskelt korjatud vetikas sisaldab umbes 90% vett, mis teeb selle otstarbetult kalliks saadava

energiahulga kohta (FAO, 2009). Seega peaks kohapeal toimuma liigse vee eemaldus, et transport oleks võimalikult väikse energia- ja ajakuluga (FAO, 2009).

Järgmine oluline komponent biogaasi tootmisel on makrovetikate anaeroobne kääritamine, mis järgib samu põhimõtteid ning etappe, mida iga teinegi substraat. Teiste toormetega võrreldes võib aga makrovetikatest biogaasi tootmine varieeruda suuresti, nii liigisiselt kui liigiväliselt, sest vetikad sõltuvad suuresti oma kasvukeskkonnast (Chynoweth, 2005; McKennedy ja Sherlock, 2015). Seetõttu on oluline millal ja kus vetikaid kogutakse (Suutari et al., 2015). Anaeroobseks kääritamiseks on võimalik kasutada nii looduslikult kogutud kui ka tööstuste poolt järele jäänud vetikamassi (Barbot et al., 2016). Viimane on võimalik, kuna tööstused kasutavad ära või töötlevad välja vetikatest osa, mis ei mõjuta kääritusprotsessi (Barbot et al., 2016).

Oluline on ka, mis tingimustes toimub anaeroobne kääritamine. Esmalt on tarvis vähendada makrovetikate osakeste suurust, kuna nii toimub anaeroobne käärimisprotsess kiiremini (McKennedy ja Sherlock, 2015). Võrreldes maismaal kasvavate kultuuridega on vetikatel suurem sulfaadisisaldus, erinev süsivesikute kompositsioon ja madalamad C/N väärtused ning seetõttu ei saa vetikate kasutamisel toormena kasutada kääritis samu mikroorganismide kultuure, mida maismaataimede puhul (Marquez et al., 2015). Lisaks ei vaja makrovetikad puhta vee lisamist protsessile, mis maismaakultuuride ja ka loomse toorme puhul on oluline (Hughes et al., 2012). Anaeroobset kääritusprotsessi võivad inhibeerida antimikroobseid ühendeid (näiteks polüfenoolid). Neid ühendeid peetakse eelkõige probleemiks just pruunvetikate puhul (Hinks et al., 2013). Samuti kääritustingimusi silmas pidades on McKennedy ja Sherlock (2015) on oma artiklis täheldanud, et metaani tootmine vetikatest pooltsüklilises režiimis on järjepidevam kui perioodilise režiimi puhul.

2.2 Läänemere näited

Euroopas on riike, mis on uurinud laboritingimustes biogaasi tootmist makrovetikatest, kuid reaalselt on vetikaid kogutud vaid toidu või kosmeetika tarvis (Mooney-McAuley et al., 2016). Kõige suuremal määral toimub kogumine Norras, kus aastas korjatakse 120 000 tonni *Laminaria* vetikaliiki, ning Prantsusmaal, kus kogus jääb 50 000 ja 70 000 tonni vahele (Murphy et al., 2015). Nimetatud riikides on potentsiaal kasutada vetikatööstuse jäätmeid biogaasi tootmiseks (Barbot et al., 2016).

Eestile lähemal ning sarnasemates tingimustes Rootsis, Trelleborgi regioonis, on suur suvine filamentsete punavetikate varu (Risén et al., 2013). 2013 aasta info põhjal eemaldati selle piirkonna rannikult märkimisväärses kogustes vetikaid turismi ning randade taastamise eesmärgil, kuid need visati tagasi Läänemerre, toomata seejuures kasu toitainete sisalduse vähendamisele (Risén et al., 2013). Nähes seda potentsiaali viidi läbi uuring, kus selgitati välja, et Trelleborgi piirkonnas leidub umbes 19 000 tonni kuiva substraati vetikate näol, millest kogutavaks peetakse 2000-6000 tonni (Risén et al., 2013). Sellest kogusest on teoreetiliselt võimalik toota elektrit 170-500 majapidamisele ning see eemaldaks Läänemerest 50-150 tonni lämmastikku aastas (Risén et al., 2013).

Potentsiaali nähakse veel mitmel pool mujal, kus rannikule kantakse eutrofeerumisest tingitud vetikamaterjali (näiteks Sopot'i rannas Poolas ja Juliusruhi rannas Saksamaal) (Barbot et al., 2016). Sopot'i rannas (rannajoon 150 km), Poolas, võib vetikate biomass ulatuda 13 000 kuni 50 000 tonnini aastas, juhul kui toore on kuivatatud hästi ja kõik liivaosakesed on eemaldatud (Bucholc et al., 2014). Kuid üldiselt kipuvad andmed täpsete vetika koguste kohta siiski puuduma, eeskätt just muutlike ilmastikutingimuste tõttu (lainetus, muutliku suunaga tuul jne) (K. Bucholc et al., 2014).

2.3 Võimalikud vetikaliigid biogaasi tootmiseks (Eestis ja Läänemeres)

Võrreldes teiste merede ja ookeanitega, on Läänemeri oma madala soolsuse (riimveelisuse) tõttu väga liigivaene (Balina et al., 2017). Töestuseks eelnevale on loendatud makrovetikaid Kattegatis, kus soolsus on 30‰ ning Põhjalahe põhjaosas, kus soolsus võib langeda 1-2‰-ni. Esimeses neist saadi liikide arvuks 442 ning teises vaid 42 (Trei, 1991). Järgnevalt tehakse ülevaade kolmest erinevast vetikatüübist, mida on võimalik kasutada biogaasi tootmiseks.

2.3.1 Rohevetikad

Rohevetikad on kõige liigirikkam vetikate hõimkond, kuid makrovetikate puhul biogaasi tootmiseks ebasoodsaim oma madala süsivesikute hulga tõttu (Marquez et al., 2015). Neil on domineeriva klorofüllü tõttu rohekas värvus ning varuaineks enamjaolt tärklis, mis on positiivne anaeroobse lagundamise seisukohalt (Trei, 1991). Rohevetikates on rohkem lipiide kui pruun- ja punavetikates ning süsivesikute hulk moodustab ligikaudu 25-50% ühenditest (Balina et al., 2017). Polüsahhariididest on enim esindatud tärklis, ulvan ja tselluloos (Marquez et al., 2015).

Üheks Läänemeres ja Eesti rannikutel enim levinuks rohevetika liigiks on filamentne *Ulva intestinalis*, mida võib suvisel ajal leida kasvamas kividel, mudas ja liivas (Balina et al., 2017).

2.3.2 Pruunvetikad

Pruunvetikad on hõimkond, mille esindajad on enamasti silmaga nähtavad (Trei, 1991). Need vetikad on ka maailmameres kõige laialdasemalt levinud ning kasvavad keskmiselt 10-20 meetri sügavusel (Trei, 1991). Süsivesikute hulk moodustab 30-50% kogu ühenditest (Balina et al., 2017). Polüsahhariididest on peamised tselluloos, mannitool, alginaat, fukoidaan ja laminaar (Marquez et al., 2015).

Pruunvetikatest on enim Eesti rannikul ja Läänemeres esindatud põisadru ehk *Fucus vesiculosus* (Balina et al., 2017). Põisadru (joonis 1) leidub peaaegu terves Eesti rannikumeres rannikualadel ning võib kasvada 80-90 cm kõrguseks (Kotta, 2016).

2.3.3 Punavetikad

Punavetikad on kahe eelmise vetikahõimkonnaga võrreldes kõige väiksem vetikate rühm. Teistest eristab neid talluse punane või punakas värvus (Trei, 1991). Elupaigana eelistavad pigem sügavaid ning varjulisi piirkondi, kuid on olemas ka liike, kes suudavad elada intensiivses valguses (Trei, 1991). Punavetikate süsivesikute hulk moodustab ligikaudu 30-60% ühenditest (Balina et al., 2017). Polüsahhariididest on enim esindatud karrageen, agar ja tselluloos (Marquez et al., 2015).

Üks vähestest punavetikaliikidest, mis on kohastunud riimveelises keskkonnas ning mida võib leida Eesti rannikult on *Furcellaria lumbricalis* ehk agarik (Balina et al., 2017). Agarik (joonis 1) on hetkel ainus vetikaliik, mida kasutatakse vesiviljeluseks (Kotta, 2016).



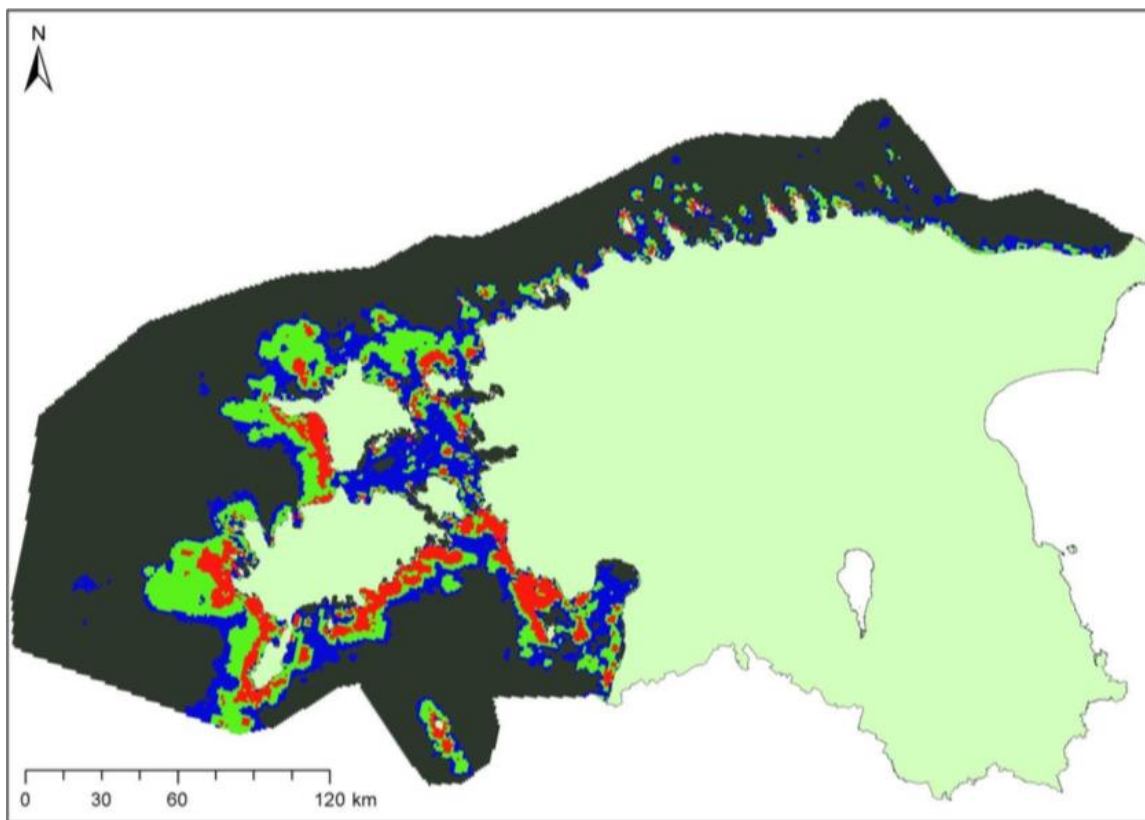
Joonis 1. Vasakul põisadru (*Fucus Vesiculosus*), paremal agarik (*Furcellaria lumbricalis*) (“ESTAGAR – The heart of Marmalade”; Stemonitis, 2006)

2.4 Makrovetikate potentsiaal Eestis

Enim levinud ning kõige potentsiaalsemad vetikaliigid vesiviljeluseks Eestis on agarik ja põisadru (Kotta, 2016). Kuigi Eesti ei ole veel tööstuslikult vetikaviljelusega tegelenud, on Est-Agar agariku puhul katsetanud vetikamassi kasvatamist, kontrollides agariku liikumist ning takistades äratriivi (Piirimäe et al., 2017). Nii oleks võimalik kasvatada ka suurema produktsiooniga põisadru, mis oleks majanduslikult soodsam, kuna sellest on võimalik valmistada rohkem erinevaid tooteid (Piirimäe et al., 2017).

Küll aga on alates 1966 aastast Eestis püütud looduslikult kasvava agariku (*Furcellaria lumbricalis*) lahtist vormi ning kasutatud seda tööstuslikul eesmärgil Est-Agari poolt (Trei, 1991). Est-Agar on ainus, kes kasutab toorainena *Furcellaria lumbricalis*'t, sest ainult Eesti rannikul on see niivõrd levinud vetikaliik ("ESTAGAR – The heart of Marmalade"). 1991 aasta seisuga oli Kassari lahes vetikate üldine toormass 140 000 tonni, millest tööstuslikku massi (ehk agarikku) oli umbes 33 000 tonni (Trei, 1991). Vetikad traalitakse, kuivatatakse ning töödeldakse ("ESTAGAR – The heart of Marmalade").

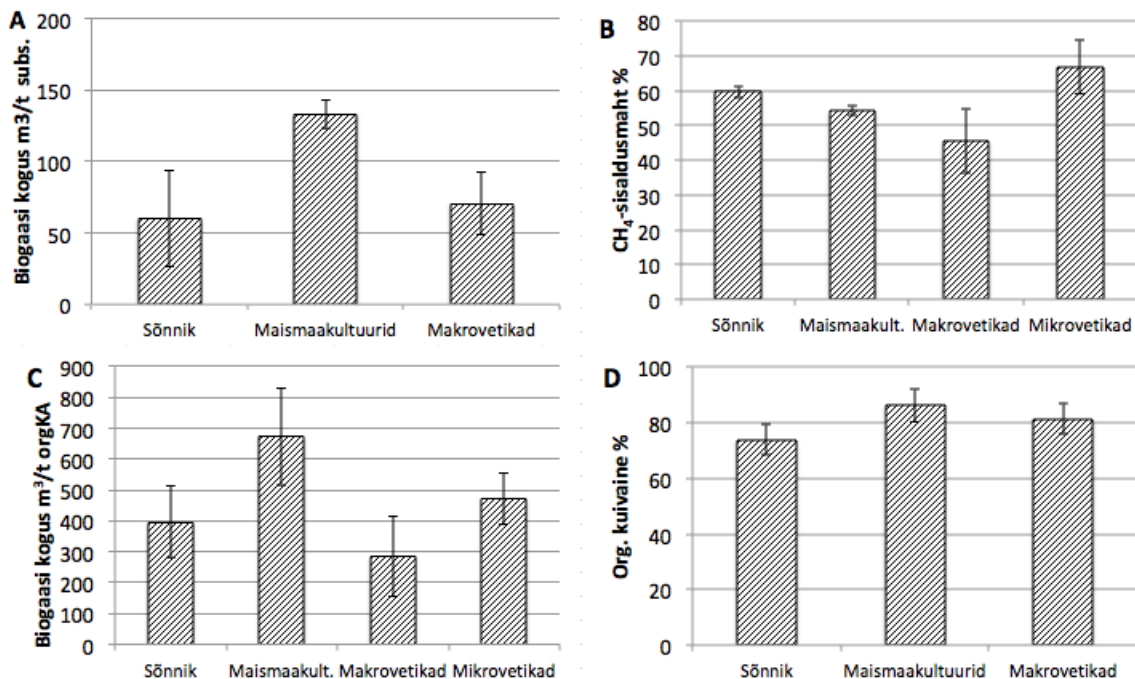
Joonis 2 kujutab TÜ mereinstituudi aruande kohaselt paiknevaid potentsiaalseid vesiviljelusalasid, mis asuvad Saaremaast ja Hiiumaast lääne pool ning Liivi lahe põhjaosas (Kotta, 2016). Samuti sobivad vesiviljeluseks Väinemere äärealad ja alad, mis jäävad Vormsi saarest põhja poole, kuid nende potentsiaal ei ole nii kõrge (Kotta, 2016). Saaremaa ja Hiiumaa piirkonna sobivust kinnitab ka asjaolu, et Kassari lahe suvine filamentsete punavetikate varu on ligi poole võrra suurem, kui on Trelleborgi lahe uurimisalal, viidates ka suuremale võimalusele makrovetikatest energiat toota (Risén et al., 2013). Kassari laht on ka suhteliselt isoleeritud, mis aitab ära hoida suuri laineid ning seega ka vetikate ärauhumist (Risén et al., 2013; Trei, 1991).



Joonis 2. Potentsiaalsed vesiviljelusalad Eesti rannikumeres (Kotta, 2016). Punane tähistab väga häid vesiviljelusalasid (75-100% vesiviljeluseks sobivatest vetikaliikidest suudavad nendel elada), roheline häid vesiviljelusealasid (50%) ning sinine võimalikke vesiviljelusalasid (25%). Mustaga on näidatud vesiviljeluseks mittesobilikud alad (nendel aladel sobivaid vetikaliike ei ela).

2.5 Makrovetikate efektiivsus võrreldes teiste biogaasi substraatidega

Andmed on kogutud kokku 18 erineva autori poolt kirjutatud artiklitest. Artiklite lugemisel on keskendutud viiele erinevale parameetrile: biogaasi kogusele substraadist ja orgaanilisest kuivainest, metaanisisaldusmahule, kuivaine protsendile ning kuivaine orgaanilise aine sisaldusele. Andmed on kantud tabelisse 1 ning nende keskmiste väärtuste põhjal on koostatud diagrammid, mis on kujutatud joonisel 3.



Joonis 3. Biogaasi kogus tonni substraadi (A) ja orgaanilise kuivaine (C) kohta, metaanisisaldus (B) ja orgaanilise kuivaine sisaldus (D).

Joonise 3A kujutab biogaasi keskmist kogust kuupmeetrites ühe tonni substraadi kohta. Keskmise biogaasi kogus ühest tonnist sõnnikust on 60,25 m³, ühest tonnist maismaakultuuridest 133,06 m³ ning ühest tonnist makrovetikatest 70,25 m³. Joonise 3C kujutab biogaasi keskmise koguse hulka ühe tonni sõnniku, maismaakultuuride, makrovetikate ja mikrovetikate orgaanilise kuivaine kohta. Kogused on vastavalt 396 m³, 672 m³, 285 m³ ja 472 m³. Keskmisest metaanisisaldusmahust annab ülevaate joonis 3B. Väärtus sõnniku puhul on 59,75%, maismaakultuuride puhul 54,21%, makrovetikate

puhul 45,60% ja mikrovetikate puhul 66,85%. Joonis 3D näitab orgaanilise kuivaine keskmist sisaldust kogu kuivainest. Sõnniku kuivaine sisaldus on 73,9%, maismaakultuuridel 86,1% ja makrovetikatel 81,4%.

Tabelis 1 on toodud artiklitest leitud andmed biogaasi koguse substraadist ja orgaanilise aine, metaanisisaldusmahu, kuivaine protsendi ja orgaanilise aine osakaalu kogu kuivainest kohta. Biogaasi kogus substraadi kohta jääb sõnnikul vahemikku 20-140 m³/t, maismaakultuuridel vahemikku 70-220 m³/t ning makrovetikatel puhul on väärtuste vahemikuks 42-103,3 m³/t. Tabel 1 andmete järgi on biogaasi kogus sõnniku puhul 200-700 m³/t orgKA, maismaakultuuridel 437,5-860 m³/t orgKA, makrovetikatel 101,7-442 m³/t orgKA ja mikrovetikatel 286,9-690,7 m³/t orgKA. CH₄-sisaldusmahu väärtused sõnniku puhul jäävad vahemikku 55-70%, maismaakultuuride puhul vahemikku 50-56%, makrovetikate puhul vahemikku 37-57% ja mikrovetikate puhul vahemikku 54-80,5%. Kõrgeim kuivaine sisaldus sõnnikul ulatub 32%-ni, maismaakultuuridel 50%-ni ja makrovetikatel 21,18%-ni. Kuivainest moodustab orgaaniline aines sõnnikul 67-86%, maismaakultuuridel 70-95% ja makrovetikatel 73,8-90%.

Tabel 1. Erinevad anaeroobse kääritusprotsessi lähtematerjalid ja nende andmed.

| | Biogaasi kogus | | CH4 - sisaldusmaht | Kuivaine | Org. Kuivaine | Viide |
|-------------------------|-------------------|------------|--------------------|----------|---------------|--|
| | m3/t substraadist | m3/t orgKA | | | | |
| Sõnnik | | | | | | |
| Veise vedelsõnnik | 20-30 | 200-500 | 60 | 8-11 | 75-82 | Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009 |
| Veise vedelsõnnik | 55 | 469 | 55 | 10 | 69 | Igliński et al., 2012; Møller et al., 2004 |
| Veise vedelsõnnik | | 610 | 61.3 | | | Mähnert and Linke, 2009 |
| Sea vedelsõnnik | 20-35 | 300-700 | 60 - 70 | u 7 | 75-86 | Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009 |
| Sea vedelsõnnik | 50 | 502 | 58 | 8 | 82 | Igliński et al., 2012; Møller et al., 2004 |
| Veise tahesõnnik | 40-50 | 210-300 | 60 | u 25 | 68-76 | Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009 |
| Veise tahesõnnik | 65 | 240 | 60 | 25 | 68 | Igliński et al., 2012; Meyer et al., 2017 |
| Sea tahesõnnik | 55-65 | 270-450 | 60 | 20-25 | 75-80 | Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009 |
| Sea tahesõnnik | 55 | 370 | 60 | 20 | 68 | Igliński et al., 2012; Meyer et al., 2017 |
| Linnusõnnik | 70-90 | 250-450 | 60 | u 32 | 63-80 | Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009 |
| Linnusõnnik | 140 | 400 | 58 | 27 | 67 | Igliński et al., 2012; Meyer et al., 2017 |
| Maismaakultuurid | | | | | | |
| Mais | 170-200 | 540-700 | 50-55 | 20-35 | 85-95 | Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009 |
| Mais | 93 | 500-700 | 54 | 25 | 85 | Igliński et al., 2012 |
| Mais | | 672.7 | 52.5 | 27.5 | 90 | Stucki, 2011 |
| Rukis | 170-220 | 550-680 | 55 | 30-35 | 92-98 | Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009 |
| Rukis | | 570-790 | | 33-46 | 95 | Deublein and Steinhauser, 2011 |
| Rukis | | 920 | 57.2 | | | Mähnert and Linke, 2009 |
| Suhkrupeet | 170-180 | 800-860 | 53-54 | 23 | 90-95 | Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009 |
| Suhkrupeet | | | | 23 | 80-95 | Deublein and Steinhauser, 2011 |

| | | | | | | |
|--------------------------------|---------|---------|-------|--------|-------|--|
| Suhkrupeet | | 760.8 | 53.5 | 23 | 92.5 | Stucki, 2011 |
| Söödapeet | 75-100 | 620-850 | 53-54 | 12 | 75-85 | Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009 |
| Söödapeet | | 729.1 | 53.5 | 12 | 80 | Stucki, 2011 |
| Peedileht | | 437.5 | 54.5 | 16 | 82.5 | Stucki, 2011 |
| Peedileht | u 70 | 550-600 | 54-55 | 16 | 75-80 | Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009 |
| Peedileht | 74 | | 56 | 15 | 79 | Igliński et al., 2012 |
| Rohusilo | 170-200 | 550-620 | 54-55 | 25-50 | 70-95 | Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009 |
| Rohusilo | | 600-700 | | 21-40 | 76-90 | Deublein and Steinhauser, 2011 |
| Pruunvetikad | | | | | | |
| <i>Saccharina latissima</i> | | 223 | 57 | 12.4 | | Vivekanand et al., 2012 |
| <i>Laminaria Digitata</i> | | 442 | | | | Tatarchenko, 2011 |
| <i>Laminaria Digitata</i> | 103.3 | 180-271 | 53 | u 10 | | Allen et al., 2015; Sarker et al., 2012; Tedesco et al., 2013 |
| <i>Fucus Serratus</i> | 64.2 | 101.7 | | 20 | | Allen et al., 2015; Tedesco et al., 2013 |
| <i>Fucus Vesiculosus</i> | | 442 | | | | Tatarchenko, 2011 |
| <i>Fucus Vesiculosus</i> | 71.5 | 126.3 | 37 | 21.18 | 86 | Allen et al., 2015; Tedesco et al., 2013 |
| Punavetikad | | | | | | |
| <i>Palmaria palmata</i> | | 453 | | | | Tatarchenko, 2011 |
| <i>Palmaria palmata</i> | | 279 | | 16 | 73.8 | (Jard et al., 2013; Murphy et al., 2015) |
| <i>Gracilaria Verrucosa</i> | | 139 | | | | Jard et al., 2013 |
| <i>Furcellaria lumbricalis</i> | | | | 15.07 | 90 | Allen et al., 2015 |
| Rohevetikad | | | | | | |
| <i>Ulva prolifera</i> | 42 | 275 | | 20 | 78 | Murphy et al., 2015; Pilicka et al., 2011; Zhuang et al., 2012 |
| <i>Ulva Lactuca</i> | | 183-250 | 48 | 9.6-18 | 82.1 | Allen et al., 2015; Jard et al., 2013; Murphy et al., 2015 |

| | | | | | | |
|----------------------------------|--|-------------|------|------|------|--------------------------|
| <i>Ulva Intestinalis</i> | | 371 | 33 | 21.3 | 78.5 | Sabunas et al., 2017 |
| <i>scenedesmus/Chlorella pp.</i> | | 405-611 | | | | Heerenklage et al., 2010 |
| Mikrovetikad | | | | | | |
| <i>Nannochloropsis spp</i> | | 388 | 80.5 | | | Heerenklage et al., 2010 |
| <i>Spirulina spp.</i> | | 556 | 76.3 | | | Heerenklage et al., 2010 |
| <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> | | 578.2-595.8 | 66 | | | Heerenklage et al., 2010 |
| <i>Chlorella kessleri</i> | | 327.2-342.8 | 65 | | | Heerenklage et al., 2010 |
| <i>Dunaliella salina</i> | | 480.2-529.8 | 64 | | | Heerenklage et al., 2010 |
| <i>Euglena gracialis</i> | | 482-488 | 67 | | | Heerenklage et al., 2010 |
| <i>Scenedesmus obliquus</i> | | 286.9-297.1 | 62 | | | Heerenklage et al., 2010 |
| <i>Zea mays</i> | | 615.3-690.7 | 54 | | | Heerenklage et al., 2010 |

3. Arutelu

Vetikad on väga mitmekülgne rühm ning nende omadused sõltuvad oluliselt neid ümbritsevast keskkonnast. Seetõttu annab ka makrovetikatest biogaasi tootmine anaeroobse kääritamise teel erinevaid tulemusi. Tabelist 1 on näha, et erinevate parameetrite väärtused varieeruvad liigiti ning isegi liigisiselt enim vetikate puhul, samal ajal kui sõnniku ja maismaataimede puhul jäävad väärtused üldiselt samasse suurusjärku. Erinevused tulevad välja eelkõige biogaasi koguste ja metaanisisaldusmahu puhul.

On näha, et makrovetikate puhul on biogaasi kogused orgaanilisest kuivainest kõige madalamad (keskmine kogus $285 \text{ m}^3/\text{t}$; tabel 1, joonis 3). Kõrgemad biogaasi kogused orgaanilise kuivaine kohta on võimelised konkureerima sõnniku ja mikrovetikatega. Suurimad biogaasi kogused orgaanilise aine kohta saavutasid Tatarchenko (2011) uuringu kohaselt *Palmaria palmata* ($453 \text{ m}^3/\text{t}$), *Fucus vesiculosus* ($442 \text{ m}^3/\text{t}$) ja *Laminaria digitata* ($442 \text{ m}^3/\text{t}$), millest *Fucus vesiculosus* (põisadru) on esindatud ka Eesti rannikuvetes. Biogaasi keskmine kogus ühe tonni kogu substraadi kohta on makrovetikatel 10 m^3 võrra suurem kui sõnnikul, kuid jääb tunduvalt alla maismaataimedele. Biogaasi hulga kogus nii kogu substraadi kui orgaanilise kuivaine kohta on suurim maismaataimedel, ulatudes kogu substraadi puhul keskmiselt $60,25 \text{ m}^3/\text{t}$ -ni ja orgaanilise kuivaine puhul $133,06 \text{ m}^3/\text{t}$ -ni.

Jooniselt 3B võib lugeda, et makrovetikate keskmine metaanisisaldusmaht on samuti madalaim, võrreldes teiste toormetega, kuid jääb üldjoontes siiski samasse suurusjärku. Makrovetikate metaanisisalduse kõrgeim väärtus (57%, *Saccharina latissima*) küündib lähedale maismaataimedest kõrgeima väärtuse omanikule - rukisele (57,2%). Antud tulbas tuleb välja ka vetikate heterogeensus, sest metaanisisalduste kõikumised, võrreldes teiste toormetega, on suured ning keskmine väärtus (45,6%), on märkimisväärselt väiksem kõrgeimast leitud metaanisisaldusmahust. Samas on maismaataimede ja sõnniku maksimaalse ja keskmise väärtuse vahe vaid paar protsenti.

Kuivaine hulk toormes jääb sõnnikul, maismaakultuuridel ja makrovetikatel samasse suurusjärku, olles siiski makrovetikatel veelise päritolu tõttu kõige väiksem (FAO, 2009). Küll aga moodustab keskmine orgaanilise aine hulk kuivainest makrovetikatel (81,4%) peaaegu võrdväärse osa maismaataimedega (86,1%). Mõlemad ületavad sõnniku (73,9%) keskmise orgaanilise aine hulka.

Tabel 1 ja joonis 3 põhjal on näha, et hoolimata makrovetikate hästi lagunevatest polüsahhariididest rakuseintest ning väiksest ligniini/tselluloosi sisaldusest, jäävad käsitletud artiklite põhjal uuritud arvulised näitajad alla sõnnikule, maismaakultuuridele ja mikrovetikatele. Kahel juhul viiest ei olnud makrovetikate tulemused kõige madalamad. Nendeks olid orgaanilise kuivaine osakaal kogu kuivainest ja biogaasi kogus orgaanilise kuivaine kohta. Kordagi ei näidanud makrovetikad kõige kõrgemaid väärtuseid.

Kuigi antud töös käsitletud arvulised näitajad jäävad teistele substraatidele alla, on makrovetikatel siiski mitmeid eeliseid biogaasi tootmiseks. Esiteks nad ei vaja põllumaad ning nende kasvatamiseks ega kääritamiseks ei kulu puhast magevett. Teiseks eeliseks on suur biomassi kogus sama ala ning valguse koguse peale ning kasvutempo on kiire. Kolmandana saab välja tuua suurema õli ja tärklise sisalduse ning väiksema tselluloosi sisalduse ja ligniini puudumise, mis tagab efektiivsema ja lõplikuma hüdrolyüüsi. Samuti nende korjamine ning ära kasutamine anaeroobse käärituse lähtematerjaliks aitab vähendada probleemsete veekogude (nt Läänemere) eutrofeerumist, sest nii viiakse vetikatesse seotud toitained veekogust välja.

Eesti on samuti üks Läänemere ääres paiknevaid riike ning omab potentsiaali vetikate kogumiseks/korjamiseks ning vesiviljeluseks. Eesti peamisteks vetikaliikideks on *Fucus vesiculosus* (põisadru), *Furcellaria lumbricalis* (agarik) ja *Ulva intestinalis*. Nendest kahe esimese puhul on täheldatud võimalusi traalimiseks ja tööstuslikuks kasutamiseks. Agariku puhul on katsetatud ka vesiviljelust. Eestis tööstuslikust kasutusest järele jäänud vetikamassi on samuti võimalik kasutada anaeroobse kääritusprotsessi toormena.

Vetikate kogumise, korjamise ja vesiviljeluse potentsiaal on suurim Lääne-Eesti saarte piirkonnas. Need alad on piisavalt isoleeritud, et takistada vetikate minema uhtumist. Näiteks Kassari lahest on saadud 33 000 tonni agarikku tööstuslikuks kasutamiseks, mille kütteväärtuseks (arvestades biogaasi üldist kütteväärtust) oleks umbes 14 489 062,5 kWh (14,5 GWh). Biogaasi tootmiseks oleks Lääne-Eesti rannik soodne paik ka seetõttu, et praegused biogaasijaamad on koondunud kõik mandri keskossa ning rannikualadel on nendest puudus.

Kokkuvõte

Tänapäeva oluline probleem on inimeste sõltumine fossiilsetest kütustest, millele otsitakse aktiivselt alternatiive. Üheks alternatiiviks peetakse biogaasi, mis on odav ja mida on võimalik toota varieeruvast lähtematerjalist näiteks maismaakultuuridest, sõnnikust jm. Uue võimalusena on hakatud rääkima ka vetikatest, mida nimetatakse kolmanda generatsiooni substraadiks biogaasi tootmisel. Põhjuseks miks vetikate kasutamine substraadina on aktuaalseks saanud on asjaolu, et nende kasvatamiseks ei ole vaja mägevett ning need ei hõlma suuri maismaa-alasid nagu seda teevad maismaa energiakultuurid. Looduslikult korjatavaid makrovetikaid on peetud ka lahenduseks Läänemere seisundi parandamisel ja eutrofeerumise vähendamisel.

Arvestades aga käesolevas töös analüüsitud andmeid (biogaasi koguseid nii substraadist kui orgaanilisest kuivainest (m^3/t), metaanisisisaldust (%), kuivaine sisaldust (%) ning orgaanilise kuivaine sisaldust (%)), siis jääb makrovetikatest biogaasi tootmise võimekus madalaks. Samuti kasvukeskkonnast tingitud erisuste tõttu varieeruvad makrovetikate näitajad ühe parameetri kohta oluliselt. Kuid asjaolu, et vetikatel, võrreldes teiste toormetega, on kiirem kasvutempo ning suurem biomassi hulk, annab võimaluse suuremaks potentsiaaliks.

Eestis asuvad potentsiaalsed makrovetika kogumise ning kasvatamise alad Saaremaa ja Hiiumaa lähistel. Seal paikneb ka Kassari laht, mis on suhteliselt isoleeritud ning tagab sellega hea keskkonna vetikate kasvamiseks ja kasvatamiseks. Samast piirkonnast toimub hetkel Eestis tööstuslikul otstarbel agariku looduslik korjamine traalimise teel ning on katsetatud ka vesiviljelust. Sama tehnikat kasutades oleks võimalik korjata vetikaid ka anaeroobse kääritusprotsessi tarbeks või vetikatööstusest järele jäänud vetikamassi kasutada ära biogaasi tootmisel.

Eesti täpsema potentsiaali biogaasi tootmiseks makrovetikatest välja selgitamiseks tuleks tulevikus viia läbi anaeroobse käärituse uuringuid Eestis esinevate ja kasvavate makrovetikaliikidega (põisadru, agarik, *Ulva intestinalis*).

Summary

An important issue today is the dependence on fossil fuels, for which alternatives are actively sought. One of the alternatives is biogas, which is inexpensive and can be produced from variable substrates, such as energy crops, manure, etc. Recently, algae has been brought up as a new alternative. Algae is the third generation substrate for biogas production. The reason why the use of algae as a substrate has become actual is the fact that they do not need fresh water to grow and they do not include large terrestrial areas as energy crops do. Naturally occurring macro-algae have also been considered as a solution for improving the status of the Baltic Sea and reducing eutrophication.

However, taking into account the data in the table (biogas volumes from the substrate and organic matter (m³ / t), methane content (%), dry matter content (%) and organic dry matter content (%)), macroalgae's biogas production capacity remains low. Due to the differences caused by the growth environment, the characteristics of macroalgae vary considerably from one parameter to another. However, the fact that algae, compared to other substrates, has faster growth rate and higher biomass amounts gives it greater potential for use.

Potential areas for the collection and cultivation of macroalgae in Estonia are near Saaremaa and Hiiumaa. Kassari Bay is also situated there. Kassari Bay is relatively isolated and provides a good environment for growing and culturing algae. Natural agaric harvesting by trawling is carried out in the same region. Also, there have been tests to grow *Furcellaria lumbricalis*. Using the same technique (trawling), it would be possible to pick algae for the anaerobic fermentation process or use the algal mass of the algal industry to produce biogas.

In order to clarify Estonia's potential for the production of biogas from macro-algae, precise studies should be carried out in the future on Estonian macroalgal species (bladder, agaric, *Ulva intestinalis*).

Kasutatud kirjandus

- Allen, E., Wall, D.M., Herrmann, C., Xia, A., Murphy, J.D., 2015. What is the gross energy yield of third generation gaseous biofuel sourced from seaweed? *Energy* 81, 352–360.
- Balina, K., Romagnoli, F., Pastare, L., Blumberga, D., 2017. Use of Macroalgae for Bioenergy Production in Latvia: Review on Potential Availability of Marine Coastline Species. *Energy Procedia* 113, 403–410.
- Barbot, Y.N., Al-Ghaili, H., Benz, R., 2016. A Review on the Valorization of Macroalgal Wastes for Biomethane Production. *Mar. Drugs* 14, 120.
- Chynoweth, D.P., 2005. Renewable Biomethane From Land and Ocean Energy Crops and Organic Wastes. *HortScience* 40, 283–286.
- Deublein, D., Steinhauser, A., 2011. *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction*. Wiley-VCH, Germany.
- Eesti Biogaasi Assotsiatsioon, 2014. Tootmine ja kasutamine. Viimane kasutus: 22.05.2018. <http://eestibiogaas.ee/tootmine-ja-kasutamine/>
- Eesti Põllumeeste Keskliit, 2009. Biogaasi tootmine ja kasutamine. OÜ Tartumaa Trükikoda, Tartu.
- ESTAGAR – The heart of Marmalade. Viimane kasutus: 16.05.2018. <http://estagar.ee/>
- FAO, 2009. Algae-based biofuels. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, Rome.
- Griffiths, M.J., Dicks, R.G., Richardson, C., Harrison, S.T., 2011. Advantages and Challenges of Microalgae as a Source of Oil for Biodiesel, in: *Biodiesel - Feedstocks and Processing Technologies*. INTECH Open Access Publisher, Croatia, pp. 177–200.
- Heerenklage, J., Maxfield, T., Zapf, A., Adwiraah, H., Wieczorek, N., Koerner, I., 2010. Anaerobic digestion of microalgae – possibilities and limits., in: *Third International Symposium on Energy from Biomass and Waste*. Environmental Sanitary Engineering Centre, Italy, pp. 8–11.
- Heitur, H., 2014. Mikrovetika *Chlorella vulgaris* Beyerincki kasvatamine CO₂. Eesti Maaülikool, Tartu.

- Hinks, J., Edwards, S., Sallis, P.J., Caldwell, G.S., 2013. The steady state anaerobic digestion of *Laminaria hyperborea* – Effect of hydraulic residence on biogas production and bacterial community composition. *Bioresour. Technol.* 143, 221–230.
- Hughes, A.D., Kelly, M.S., Black, K.D., Stanley, M.S., 2012. Biogas from Macroalgae: is it time to revisit the idea? *Biotechnol. Biofuels* 5, 86.
- Igliński, B., Buczkowski, R., Iglińska, A., Cichosz, M., Piechota, G., Kujawski, W., 2012. Agricultural biogas plants in Poland: Investment process, economical and environmental aspects, biogas potential. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 4890–4900.
- Jard, G., Marfaing, H., Carrère, H., Delgenes, J.P., Steyer, J.P., Dumas, C., 2013. French Brittany macroalgae screening: Composition and methane potential for potential alternative sources of energy and products. *Biosource Technol.* 144, 492–498.
- K. Bucholc, M. Szymczak-Żyła, L. Lubecki, A. Zamojska, P. Hapter, E. Tjernström, G. Kowalewska, 2014. Nutrient content in macrophyta collected from southern Baltic Sea beaches in relation to eutrophication and biogas production. *Sci Total Env.* 473, 298–307.
- Kask, Ü., 2010. Olemasolev olukord biogaasi tootmises. Eesti aruanne. Tallinna Tehnikaülikool. Soojustehnika instituut.
- Kotta, J., 2016. Mereala planeeringu alusuuring- selgrootute ja vetikate vesiviljeluseks sobilikud alad. TÜ Eesti Mereinstituut.
- Kukke, A., 2015. Biogaasi tootmiseseadmete uurimus. Eesti Maaülikool, Tartu.
- White, W.L., Wilson, P., 2015. Chapter 2 - World seaweed utilization, in: Tiwari, B.K., Troy, D.J. (Eds.), *Seaweed Sustainability*. Academic Press, San Diego, pp. 7–25.
- Mähnert, P., Linke, B., 2009. Kinetic study of biogas production from energy crops and animal waste slurry: Effect of organic loading rate and reactor size. *Environ. Technol.* 30, 93–99.
- Marquez, G.P.B., Santiañez, W.J.E., Trono Jr., G.C., de la Rama, S.R.B., Takeuchi, H., Hasegawa, T., 2015. Chapter 16 - Seaweeds: a sustainable fuel source, in: Tiwari, B.K., Troy, D.J. (Eds.), *Seaweed Sustainability*. Academic Press, San Diego, pp. 421–458.
- McKennedy, J., Sherlock, O., 2015. Anaerobic digestion of marine macroalgae: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 1781–1790.

- Meyer, A.K.P., Ehimen, E.A., Holm-Nielsen, J.B., 2017. Future European biogas: Animal manure, straw and grass potentials for a sustainable European biogas production. *Biomass Bioenergy* 154–164.
- Møller, H.B., Sommer, S.G., Ahring, B.K., 2004. Biological Degradation and Greenhouse Gas Emissions during Pre-Storage of Liquid Animal Manure. *J. Environ. Qual.* 27–36.
- Montingelli, M.E., Tedesco, S., Olabi, A.G., 2015. Biogas production from algal biomass: a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 43, 961–972.
- Mooney-McAuley, K.M., Edwards, M.D., Champenois, J., Gorman, G., 2016. Best Practice Guidelines for Seaweed Cultivation and Analysis (No. WP1A5.01). EnAlgae.
- Morand, P., Merceron, M., 2005. Macroalgal Population and Sustainability. *J. Coast. Res.* 1009–1020.
- Murphy, J.D., Drosig, B., Allen, E., Jerney, J., Xia, A., Herrmann, C., 2015. A perspective on algal biogas. *IEA Bioenergy*.
- Olt, J., Jõgi, E., Menind, A., 2007. Biogaasi tootmistehnoloogiad, in: Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine, VIII & IX. Eesti Maaülikool, Tartu, pp. 45–55.
- Piirimäe, K., Pihor, K., Rozeik, H., Piirits, M., 2017. Mereala planeeringu alusuuring: merekeskkonna ressursside kasutamisest saadava majandusliku kasu mudel. *Poliit. Keskus Prax.*
- Pilicka, I., Blumberga, D., Romagnoli, F., 2011. Life Cycle Assessment of Biogas Production from Marine Macroalgae: a Latvian Scenario. *Sci. J. Riga Tech. Univ. Environ. Clim. Technol.* 66–78.
- Risén, E., Pechsiri, J.S., Malmström, M.E., Brandt, N., Gröndahl, F., 2013. Natural Resource Potential of Macroalgae Harvesting in the Baltic Sea-Case Study Trelleborg, Sweden, in: Moksness, E., Dahl, E., Støttrup, J. (Eds.), *Global Challenges in Integrated Coastal Zone Management*. John Wiley & Sons, Ltd, Oxford, UK, pp. 69–84.
- Sabunas, A., Romagnoli, F., Pastare, L., Balina, K., 2017. Laboratory Algae Cultivation and BMP Tests with *Ulva intestinalis* from the Gulf of Riga. *Energy Procedia* 113, 277–284.
- Sarker, S., Bruhn, A., Ward, A.J., Møller, H.B., 2012. Bio-fuel from anaerobic co-digestion of the Macro-algae *Ulva lactuca* and *Laminaria digitata*. *Renew. Energy Energy Effic. Int. Sci. Conf.* 28–30.

- Stemonitis, 2006. *Fucus vesiculosus* Wales. Viimane kasutus: 29.05.2018. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fucus_vesiculosus_Wales.jpg
- Stucki, M., 2011. Life Cycle Assessment of Biogas Production from Different Substrates 84.
- Suutari, M., Leskinen, E., Fagerstedt, K., Kuparinen, J., Kuuppo, P., Blomster, J., 2015. Macroalgae in biofuel production. *Phycol. Res.* 63, 1–18.
- Tatarchenko, O., 2011. Assessment of macroalgae harvesting from the Baltic Sea from an energy balance perspective. Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Teder, M., 2013. Vormsi mees hakkab meres vetikaid kasvatama. Postimees. Viimane kasutus 22.05.2018 <https://www.postimees.ee/2628638/vormsi-mees-hakkab-meres-vetikaid-kasvatama>
- Tedesco, S., Benyounis, K.Y., Olabi, A.G., 2013. Mechanical pretreatment effects on macroalgae-derived biogas production in co-digestion with sludge in Ireland. *Energy* 61, 27–33.
- Tilk, A., 2017. Toidujäätmete biogaasi tootlikkus. Eesti Maaülikool, Tartu.
- Trei, T., 1991. Taimed Läänemere põhjal. Valgus, Tallinn.
- Vanegas, C.H., Bartlett, J., 2013. Green energy from marine algae: biogas production and composition from the anaerobic digestion of Irish seaweed species. *Environ. Technol.* 34, 2277–2283.
- Masing, V., 1992. Ökoloogialeksikon: loodusteaduslik oskussõnastik. Eesti Entsüklopeediakirjastus, Tallinn.
- Vivekanand, V., Eijssink, V.G.H., Horn, S.J., 2012. Biogas production from the brown seaweed *Saccharina latissima* thermal pretreatment and codigestion with wheat straw. *J. Appl. Phycol.* 24, 1295–1301.
- Zhuang, Y., Guo, J., Chen, L., Li, D., Liu, J., Ye, N., 2012. Microwave-assisted direct liquefaction of *Ulva prolifera* for bio-oil production by acid catalysis. *Bioresour. Technol.* 116, 133–139.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Mairika Kõlvart,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose “Makrovetikatest biogaasi tootmise potentsiaal”, mille juhendaja on Kuno Kasak,
 - 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace’i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **30.05.2018**